

室内空气中有机紫外防晒剂的检测及其污染特征

陆宏, 王泽, 崔涵博, 金一卉, 杨帆, 冯丽丽, 胡晓芳, 申哲民, 袁涛

上海交通大学环境科学与工程学院/国家环境保护新型污染物环境健康影响评价重点实验室, 上海 200240

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.21106

摘要:

[背景] 有机紫外防晒剂被广泛用于个人护理品中。前期研究发现室内灰尘中可检出有机紫外防晒剂。

[目的] 采用热脱附-气相色谱质谱联用技术检测不同室内空气中的有机紫外防晒剂, 揭示室内空气有机紫外防晒剂的污染状况和特征。

[方法] 于 2020 年 8—11 月在上海交通大学闵行校区及周边 8 种不同室内环境(男生寝室、女生寝室、办公室、实验室、理发店、打印店、宾馆、私家车)共 60 个点位采集空气样本。利用热脱附-气相色谱质谱联用技术检测不同室内空气中 6 种常见有机紫外防晒剂浓度, 包括 3, 3, 5-三甲基环己烷水杨酸酯(HMS)、水杨酸乙基己酯(EHS)、3-(4-甲基苄烯)-樟脑(4-MBC)、*p*-甲氧基肉桂酸异戊酯(IMC)、氰酸苯丙基烯酸辛酯(OC)、4-甲氧基肉桂酸-2-乙基己酯(EHMC), 并分析有机紫外防晒剂的相关性。

[结果] 在研究设定的检测条件下, 6 种有机紫外防晒剂的定量标准曲线相关系数均为 0.997 及以上。1 mg·L⁻¹ 样品的相对标准偏差在 1.74%~7.11%之间, 回收率在 67.17%~106.50%之间; 10 mg·L⁻¹ 样品的相对标准偏差在 3.59%~8.76%, 回收率在 78.80%~126.60%。除 IMC 未检出以外, 其余 5 种有机紫外防晒剂在 8 种室内环境空气中检出率均大于等于 92%。总有机紫外防晒剂中位质量浓度为 75.17 ng·m⁻³, 其中 EHS 最高, 为 28.55 ng·m⁻³。不同室内环境中, 女生寝室的室内空气中总有机紫外防晒剂的平均质量浓度最高, 为 154.98 ng·m⁻³。相关性分析结果显示, HMS、EHMC、OC 与 EHS 呈不同程度的相关性($r=0.40\sim0.61$, $P<0.01$)。

[结论] 热脱附-气相色谱质谱联用技术适用于室内空气中有机紫外防晒剂的检测分析; EHS、EHMC、HMS、OC、4-MBC 在 8 种室内环境空气中均被检出, 且其污染源有一定同源性。

关键词: 热脱附-气相色谱质谱联用技术; 室内; 空气; 有机紫外防晒剂

Identifications and characteristics of organic ultraviolet filters in indoor air LU Hong, WANG Ze, CUI Hanbo, JIN Yihui, YANG Fan, FENG Lili, HU Xiaofang, SHEN Zheming, YUAN Tao (School of Environmental Science and Engineering/State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Health Impact Assessment of Emerging Contaminants, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract:

[Background] Organic ultraviolet (UV) filters are widely used in personal care products. So far, relevant studies on organic UV filters in indoor dust have been reported.

[Objective] This study aims to establish a thermal desorption combined with gas chromatography-mass spectrometry (TD-GCMS) method to identify organic UV filters in indoor air collected from different indoor environments, so as to reveal the pollution levels and characteristics of organic UV filters in indoor environment.

[Methods] Based on the standard indoor air sampling protocol, a total of 60 samples were collected from eight different kinds of indoor environments (male and female dormitory rooms, offices, labs, barber shops, printing shops, hotels, and private cars) on and nearby Minhang Campus of Shanghai Jiao Tong University from August to November, 2020. The concentrations of six common organic UV filters, including homosalate (HMS), 2-ethylhexyl salicylate (EHS), 3-(4-

基金项目

国家自然科学基金面上项目(21277092); 上海交通大学医工交叉重点项目(YG2019 ZDA29)

作者简介

并列第一作者。

陆宏(1998—), 女, 硕士生;

E-mail: luhong03@sjtu.edu.cn

王泽(1995—), 男, 硕士生;

E-mail: 486513@sjtu.edu.cn

通信作者

袁涛, E-mail: taoyuan@sjtu.edu.cn

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-03-18

录用日期 2021-11-04

文章编号 2095-9982(2021)12-1345-05

中图分类号 R12

文献标志码 A

►引用

陆宏, 王泽, 崔涵博, 等. 室内空气中有机紫外防晒剂的检测及其污染特征 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38(12): 1345-1349.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21106

Funding

This study was funded.

Correspondence to

YUAN Tao, E-mail: taoyuan@sjtu.edu.cn

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-03-18

Accepted 2021-11-04

► To cite

LU Hong, WANG Ze, CUI Hanbo, et al. Identifications and characteristics of organic ultraviolet filters in indoor air[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(12): 1345-1349.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21106

methylbenzylidene)-camphor (4-MBC), isoamyl 4-methoxycinnamate (IMC), octocrylene (OC), and octyl 4-methoxycinnamate (EHMC), in the air of different indoor environments were detected by TD-GCMS. Furthermore, the correlations of individual organic UV filters in different indoor environments were analysed.

[Results] Under optimized detection conditions, the correlation coefficients of the quantitative standard curves of selected six organic UV filters were all at or above 0.997. The relative standard deviations of $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-3}$ samples ranged from 1.74% to 7.11%, and the recoveries ranged from 67.17% to 106.5%. The relative standard deviations of $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-3}$ samples ranged from 3.59% to 8.76%, and the recoveries ranged from 78.80% to 126.60%. The detection rates of the other five organic UV filters except IMC were all at or more than 92% in eight different kinds of indoor air. The median concentration of total organic UV filters was $75.17 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, and EHS presented the highest median concentration of $28.55 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. Regarding different indoor environments, the highest concentration of total organic UV filters was found in the female dormitory samples, $154.98 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. The respective pair-analysis among HMS, EHMC, OC, and EHS of all indoor air samples reached a significant level of correlation ($r=0.40-0.61$, $P<0.01$).

[Conclusion] The TD-GCMS method is satisfactory for the determination of organic UV filters in indoor air. EHS, EHMC, HMS, OC, and 4-MBC are identified in selected eight indoor environments, and they may have similar sources of pollution.

Keywords: thermal desorption combined with gas chromatography-mass spectrometry; indoor; air; organic ultraviolet filter

防晒霜以及许多个人护理品中常常添加的有机紫外防晒剂是一类新型污染物,这些化学物质可能在其生产、使用和处置过程中进入环境,其生物毒性及其健康风险问题已在世界范围内引起了广泛关注^[1]。有研究证明在北极的细菌中检测到有机紫外防晒剂^[2],表明有机紫外防晒剂具有较强的长距离迁移能力和环境持久性。由于有机紫外防晒剂大多为亲脂性物质,性质相对稳定,难以生物降解,可通过生物富集^[3]和生物放大作用^[4-5]进入生物体内,会对人体造成如甲状腺损伤^[6]、肥胖^[7]、男性生殖能力下降^[8]等风险。

多项研究证实有机紫外防晒剂存在于不同环境介质或特殊区域(如沉积物、水、鱼、海滩和珊瑚群落等)中,空气中有有机紫外防晒剂的污染状况也有报道。例如,Ribeiro等^[9]使用生物采样器在沿海地区的空气中检测到有机紫外防晒剂,Shoeib等^[10]利用被动空气采样在污水处理厂排放的空气中检测到有机紫外防晒剂,Pegoraro等^[11]利用主动空气采样检测出城市空气中的紫外防晒剂。有机紫外防晒剂属于半挥发性有机物,能在室内空气中相对持久地存在。室内是人们暴露于紫外防晒剂的重要场所,课题组前期研究发现室内灰尘中可检出有机紫外防晒剂,且对儿童有较高的健康风险^[12-13]。了解有机紫外防晒剂在室内空气中的浓度以及污染状况,对该类物质的健康风险评估具有重要意义。近年来,热脱附-气相色谱质谱联用技术已被成功应用于检测空气中多环芳烃类、苯酚类、苯胺类和硝基芳香烃类等半挥发性有机物^[14-16]。本研究采用热脱附-气相色谱质谱联用技术建立室内空气中有机紫外防晒剂检测方法,并通过分析典型室内环境空气样本,探究其污染特征。

1 材料与方法

1.1 主要试剂和仪器

6种典型有机紫外防晒剂标准品:3,3,5-三甲基环己烷水杨酸酯(homosalate, HMS; 纯度 $\geq 98\%$; TCL, 日本)、水杨酸乙基己酯(2-ethylhexyl salicylate, EHS; 纯度 $\geq 97\%$; TCL, 日本)、3-(4-甲基苄烯)-樟脑[3-(4-methylbenzylidene)-camphor, 4-MBC; 纯度 $\geq 99\%$; Alfa Aesar, 美国]、*p*-甲氧基肉桂酸异戊酯(isoamyl 4-methoxycinnamate, IMC; 纯度 $\geq 97\%$; Sigma Aldrich, 美国)、氰酸苯丙基烯酸辛酯(octocrylene, OC; 纯度 $\geq 97\%$; Sigma Aldrich, 美国)、4-甲氧基肉桂酸-2-乙基己酯(2-ethylhexyl-4-methoxycinnamate, EHMC; 纯度 $\geq 97\%$; Sigma Aldrich, 美国)。内标物 BP-d₁₀(纯度 97%; Sigma Aldrich, 美国)。色谱纯有机试剂(乙酸乙酯、甲醇、乙腈等; CNW, 德国)。

TD-XR100型热脱附仪(Markes, 美国)、Tenax-ta管(Camsco, 美国)、大气采样仪(北京市科安劳保新技术公司, 中国)、TC-20型热脱附老化仪(Markes, 美国)、7890B-5977B气相色谱质谱联用分析仪(Agilent, 美国)。

1.2 方法条件

1.2.1 采样条件 采样时间为2020年8—11月。采样地点为上海交通大学闵行校区内及周边8种典型室内环境,分别为男生寝室($n=10$)、女生寝室($n=10$)、办公室($n=5$)、实验室($n=10$)、理发店($n=10$)、打印店($n=5$)、宾馆($n=5$)、私家车($n=5$)。采取随机抽样方法选取采样点,采样点的布设严格按照GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》执行,除实验室以外,由于各室内环境的面积不足 50 m^2 ,故设置1个采样点并

位于对角线中心,采样高度为距地面 0.5~1.5 m。设定采样流量 $0.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样时间 2 h,每个点平行采样 2 次,完成采样后,立即用密封帽将吸附管两端密封,4 °C 避光保存,7 d 内分析。

1.2.2 热脱附仪条件 热解析流量 $100\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,热脱附温度 330 °C,热解析时间 20 min。热脱附程序设定:初始冷阱温度设置为-10 °C,以最大升温速率快速升至 330 °C,流速为 $5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.2.3 气相色谱-质谱条件 色谱柱: DB-5 MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm);柱温程序: 80 °C 保持 2 min,以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 上升至 180 °C,以 $3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 上升至 240 °C,再以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 上升至 300 °C,保持 10 min;进样方式:不分流进样;接口温度: 300 °C;离子源温度: 230 °C;分析方式:单离子检测扫描(single ion monitoring, SIM);检测器电压: 1.41 kV。

1.3 选择离子色谱图的绘制

用乙腈配制 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 标准混合溶液在“1.2.2”和“1.2.3”的分析条件下进样 1 μL,得到 6 种有机紫外防晒剂的选择离子色谱图。

1.4 标准方程的建立

1.4.1 标准系列配制及相关性能测试 将待测的 6 种典型有机紫外防晒剂标准品用乙腈溶剂配制成 0.1、0.2、0.5、1.0、5.0、10.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的紫外混标溶液。采用内标法,以 BP-d₁₀ 作为 4-MBC、EHMC、EHS、IMC、OC、HMS 的参比内标物质,配制 $10.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BP-d₁₀ 单标储备液,在各梯度浓度的紫外混标中均加入 1 μL BP-d₁₀ 内标溶液进行测试分析。以 6 种紫外防晒剂的物质量为横坐标,不同梯度浓度的目标物质和内标物质的峰面积之比为纵坐标绘制标准曲线。对 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的紫外混标溶液分别进行 6 次平行重复实验,得到回收率和精密度。

1.4.2 标样加载 利用热脱附标样加载装置,用微量注射器取 1.0 μL 混标溶液注入空白吸附管(使用前热脱附管在 320 °C 下老化处理 30 min),用 $30\sim50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的氮气吹扫吸附管 2 min,迅速取下吸附管,用密封帽将吸附管两端密封,得到 0.1、0.2、0.5、1.0、5.0、10.0 ng(内标含量 10.0 ng)的校准系列吸附管。

1.5 室内有机紫外防晒剂污染状况分析

用上述建立的热脱附-气相色谱质谱联用方法分别对 8 个不同室内场所采集的样品进行定量检测,对比不同室内空气中的紫外防晒剂浓度数据。同时,使用 SPSS 24.0 软件对室内空气样本进行 Pearson 相关性分析,检验不同紫外防晒剂的相关性。

2 结果

2.1 选择离子色谱图

本研究选取的 6 种有机紫外防晒剂的选择离子色谱图见图 1。可见,各检测物质出峰正常,分离度较好。

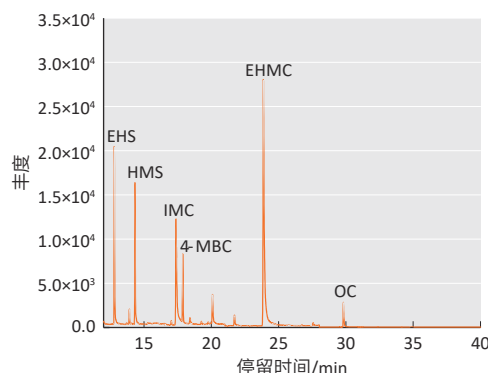


图 1 有机紫外防晒剂的选择离子色谱图
Figure 1 SIM spectrum of organic UV filters

2.2 标准曲线及定量限

对目标物质的峰面积进行比较,以 3 倍信噪比计算物质含量检出限,以 10 倍信噪比估算定量限,其中 EHS、HMS、IMC 的定量限在 0.05 ng 附近,4-MBC、EHMC、OC 的定量限在 0.1 ng 附近,目标物质在各浓度范围内线性关系良好,相关系数均大于等于 0.997。6 种有机紫外防晒剂的标准曲线及相关参数见表 1。

表 1 有机紫外防晒剂的标准曲线方程和相关参数
Table 1 Standard curve equation and related parameters of organic UV filters

有机紫外防晒剂	停留时间/min	选择离子	曲线方程	相关系数	定量限/ng
EHS	12.77	138	$y=9.33\times10^{-4}x+5.97\times10^{-5}$	0.997	0.05~10.00
HMS	14.32	138	$y=7.82\times10^{-4}x+1.52\times10^{-4}$	0.997	0.05~10.00
IMC	17.39	178	$y=9.61\times10^{-4}x+2.89\times10^{-4}$	0.998	0.50~10.00
4-MBC	17.86	254	$y=4.23\times10^{-4}x+2.22\times10^{-5}$	0.998	0.10~10.00
EHMC	23.86	178	$y=4.78\times10^{-3}x+6.47\times10^{-4}$	0.998	0.10~10.00
OC	29.79	360	$y=2.40\times10^{-4}x+1.84\times10^{-5}$	0.998	0.10~10.00

2.3 重复性实验结果

重复性实验结果表明, $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 样品各组分的相对标准偏差为 1.74%~7.11%,回收率为 67.17%~106.50%; $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 样品各组分的相对标准偏差为 3.59%~8.76%,回收率为 78.80%~126.60%。见表 2。

表 2 方法的样品加标回收率及精密度
Table 2 Standard recovery and precision for the method

有机紫外防晒剂	混标质量浓度/(mg·L ⁻¹)	平行样品质量浓度/(mg·L ⁻¹)							相对标准偏差/%	回收率/%
		1	2	3	4	5	6	均值		
EHS	1	1.04	0.97	1.01	0.94	0.91	0.93	0.97	5.18	96.67
	10	11.27	10.65	9.24	11.12	9.45	11.23	10.49	8.76	100.49
HMS	1	0.86	0.88	0.91	0.87	0.79	0.91	0.87	5.09	87.00
	10	9.89	9.64	8.34	9.93	9.24	10.56	9.60	7.84	96.00
IMC	1	0.82	0.79	0.85	0.90	0.86	0.84	0.84	4.42	84.33
	10	8.84	8.96	8.91	9.21	7.96	9.54	8.90	5.94	89.00
4-MBC	1	1.08	1.04	1.17	1.09	0.97	0.98	1.06	7.11	105.50
	10	12.23	13.32	11.66	12.74	11.87	14.13	12.66	7.42	126.60
EHMC	1	1.17	1.06	1.02	1.04	1.09	1.01	1.07	5.53	106.50
	10	10.98	10.23	12.12	12.46	10.67	12.01	11.41	7.93	114.10
OC	1	0.66	0.67	0.66	0.68	0.67	0.69	0.67	1.74	67.17
	10	7.46	7.87	8.04	7.96	8.27	7.68	7.88	3.59	78.80

2.4 室内有机紫外防晒剂污染状况

本研究选择的有机紫外防晒剂中,除了 IMC 未检出以外,其余有机紫外防晒剂在室内空气样本中均有不同程度的检出,质量浓度高于方法定量限。总有机紫外防晒剂中位质量浓度为 75.17 ng·m⁻³,其中 EHS 的中位质量浓度最高,为 28.55 ng·m⁻³。见表 3。

表 3 室内空气中有机紫外防晒剂的检出率和浓度
Table 3 Detection rates and concentrations of organic UV filters in indoor air

有机紫外防晒剂	检出率/%	质量浓度/(ng·m ⁻³)					
		均值	Min	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	Max
EHS	100	40.68	5.15	17.02	28.55	54.32	166.81
HMS	100	16.48	9.07	12.56	14.85	20.9	28.57
IMC	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4-MBC	92	3.36	ND	2.37	2.93	4.44	5.38
EHMC	100	26.75	17.37	19.06	26.26	32.59	78.57
OC	100	3.67	1.93	3.11	3.89	4.26	5.01
Σ有机紫外防晒剂	100	92.36	23.18	47.38	75.17	112.7	201.43

[注]ND: 未检出。

不同室内环境空气中总有机紫外防晒剂平均浓度见图 2。其中,女生寝室中有机紫外防晒剂质量浓度最高,为 154.98 ng·m⁻³,其次为理发店(138.87 ng·m⁻³)、打印店(86.06 ng·m⁻³)、宾馆(86.01 ng·m⁻³)、私家车(80.78 ng·m⁻³)、实验室(56.38 ng·m⁻³)、办公室(53.62 ng·m⁻³),男生寝室最低,为 50.71 ng·m⁻³。

2.5 室内空气中不同有机紫外防晒剂的相关性

各紫外防晒剂间的 Pearson 相关性结果如表 4 所示。由表可见 EHS 与 HMS、EHMC、OC 呈正相关($r=0.605$ 、 0.505 、 0.400 ,均 $P<0.01$)。

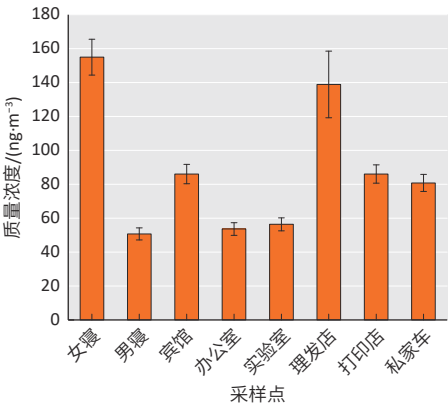


图 2 不同室内环境空气中总有机紫外防晒剂的平均浓度
Figure 2 Average concentrations of total organic UV filters in different indoor environments

表 4 室内空气中有机紫外防晒剂浓度的相关性
Table 4 Correlations among the levels of individual organic UV filters in indoor air

有机紫外防晒剂	HMS	4-MBC	EHMC	OC
EHS	0.605**	0.154	0.505**	0.400**
HMS	1	0.067	0.465**	0.415**
4-MBC	—	1	-0.167	0.456**
EHMC	—	—	1	0.074

[注]**: $P<0.01$ 。

3 讨论

有机紫外防晒剂作为一类新兴污染物,一直备受关注。针对室内空气中的有机紫外防晒剂的检测存在一定难度,本研究研发了一种对室内空气中有机紫外防晒剂灵敏快捷的痕量检测分析方法,即热脱附-气相色谱联用技术,该方法省去了前期样品以及各种溶剂配制工作,绿色环保,且自动化程度高。基于所建立的

方法,本研究检测了不同室内环境中有机紫外防晒剂的污染水平,揭示了其污染特征,补充了其污染浓度数据,为这类新兴污染物的健康风险评估提供了关键的数据支撑。

本研究发现,6种有机防晒剂(EHS、HMS、IMC、4-MBC、EHMC、OC)中,除IMC未检出,其余在不同的室内空气中均有检出,且检出率接近100%,8种室内场所总有机紫外防晒剂浓度从高到低为女寝>理发店>打印店>私家车>宾馆>实验室>办公室>男寝,其中女生寝室中浓度是其他地点的1.12~3.05倍。在这些室内环境空气中EHS、HMS、EHMC浓度均占前三,与Pegoraro等^[11]报道的城市空气检测结果相似。本研究选取的室内环境为有机紫外防晒剂检出率较高且易采样检测的场所,样本量覆盖检测分析的室内有机紫外防晒剂,可满足实验要求,但样本对于反映上海乃至全国的室内有机紫外防晒剂污染状况存在局限性,在后续的研究中可扩大样本量及增加采样地点。此外,本研究未同步检测同一场所户外的目标物浓度,对于揭示有机紫外防晒剂总体污染及人体风险暴露状况方面有待优化。

本研究相关性分析结果表明,有机紫外防晒剂污染源有一定同源性。EHS、HMS、4-MBC、EHMC和OC通常混合添加到个人护理品^[2]中,因此可以初步推断出个人护理品是室内空气环境中有机紫外防晒剂的主要来源。上述数据分析结果也提示存在其他来源(例如电子器原件、打印机释放、办公用品等)。但目前为止,关于室内空气中有机紫外防晒剂的来源分析较少,亟待进一步探索研究。

综上所述,热脱附-气相色谱质谱联用技术适用于室内空气中有机紫外防晒剂的检测分析;EHS、EHMC、HMS、OC、4-MBC在8种室内环境空气中均被检出,且其污染源有一定同源性。

参考文献

- [1] HUANG Y, LAW J C F, LAM T K, et al. Risks of organic UV filters: a review of environmental and human health concern studies[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 755: 142486.
- [2] TSUI M M P, LEUNG H W, WAI T C, et al. Occurrence, distribution and ecological risk assessment of multiple classes of UV filters in surface waters from different countries[J]. *Water Res*, 2014, 67: 55-65.
- [3] FENT K, ZENKER A, RAPP M. Widespread occurrence of estrogenic UV-filters in aquatic ecosystems in Switzerland[J]. *Environ Pollut*, 2010, 158(5): 1817-1824.
- [4] GAO L, YUAN T, ZHOU C, et al. Effects of four commonly used UV filters on the growth, cell viability and oxidative stress responses of the *Tetrahymena thermophila*[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(10): 2507-2513.
- [5] ORAL D, YIRUN A, ERKEKOGLU P. Safety concerns of organic ultraviolet filters: special focus on endocrine-disrupting properties[J]. *J Environ Pathol Toxicol Oncol*, 2020, 39(3): 201-212.
- [6] AKER A M, JOHNS L, MCEL RATH T F, et al. Associations between maternal phenol and paraben urinary biomarkers and maternal hormones during pregnancy: a repeated measures study[J]. *Environ Int*, 2018, 113: 341-349.
- [7] AHN S, AN S, LEE M, et al. A long-wave UVA filter avobenzone induces obesogenic phenotypes in normal human epidermal keratinocytes and mesenchymal stem cells[J]. *Arch Toxicol*, 2019, 93(7): 1903-1915.
- [8] REHFELD A, DISSING S, SKAKKEBÆK N E. Chemical UV filters mimic the effect of progesterone on Ca^{2+} signaling in human sperm cells[J]. *Endocrinology*, 2016, 157(11): 4297-4308.
- [9] RIBEIRO H, RAMOS S, HOMEM V, et al. Can coastline plant species be used as biosamplers of emerging contaminants? -UV-filters and synthetic musks as case studies[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 1134-1140.
- [10] SHOEIB M, SCHUSTER J, RAUERT C, et al. Emission of poly and perfluoroalkyl substances, UV-filters and siloxanes to air from wastewater treatment plants[J]. *Environ Pollut*, 2016, 218: 595-604.
- [11] PEGORARO C N, HARNER T, SU K, et al. Occurrence and gas-particle partitioning of Organic UV-filters in urban air[J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(20): 12881-12889.
- [12] AO J, YUAN T, MA Y, et al. Identification, characteristics and human exposure assessments of triclosan, bisphenol-A, and four commonly used organic UV filters in indoor dust collected from Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 575-583.
- [13] AO J, YUAN T, GAO L, et al. Organic UV filters exposure induces the production of inflammatory cytokines in human macrophages[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 635: 926-935.
- [14] KIM Y H, JO S, AN Y J, et al. Thermal desorption technique for analysis of aerosolized methylchloroisothiazolinone/methylisothiazolinone (CMIT/MIT) in inhalation toxicity testing[J]. *J Chromatogr Sci*, 2020, 58(3): 187-194.
- [15] MATERIĆ D, PEACOCK M, KENT M, et al. Characterisation of the semi-volatile component of dissolved organic matter by thermal desorption - proton transfer reaction - mass spectrometry[J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 15936.
- [16] XU R, ALAM M S, STARK C, et al. Behaviour of traffic emitted semi-volatile and intermediate volatility organic compounds within the urban atmosphere[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 720: 137470.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 汪源)